地質ニュース665号，53－62頁，2010年1月
Chishitsu News no.665, p.53－62, January, 2010

絶対重力計測の現場から

杉 原 光 彦[1)]

1. はじめに

2009年4月20日，筑波山麓にある国民宿舎「つくばね」の会議室で今年も恒例の絶対重力計比較観測会が始まった．2年ぶりの参加になるが，今年の参加者の中では私が最年長のようだ．初対面の人がいる．名刺交換すると，地震研究所の田中愛幸さんだった．

「ああ，あなたが田中さんでしたか．1998年の岩手県内陸北部地震前後の重力変化を解析したあの論文（Tanaka *et al.*, 2001）は時々引用させていただいています．実はあの地震直後の絶対重力計測には私もほんの少し貢献したのですよ．私はあの時は絶対重力計測点のすぐ横で相対重力計による連続観測をしていたのです（杉原・山本, 1998）．秋田県での作業を終えて東北自動車道を岩手県に入って間もなく，地震発生の警告表示が目に入って地震発生に気付きました．発生から1時間以内には現場に入っていました．まさに震度6弱を記録した地点なので私の重力計は横転していましたが，地点周辺はわずかに崩れていたものの電源は通じていて観測可能な状況だったので，絶対重力計を撤収して間もない国土地理院の担当の方に連絡したのです．すぐにも測定できますよと.....」

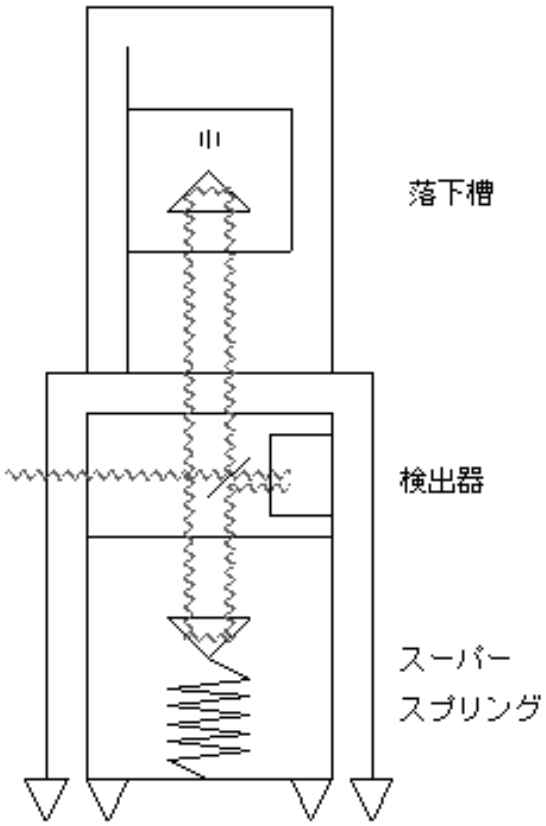
最年長者の思い出話はつい長くなってしまう．カチャッカチャッという絶対重力計の落下音が響く傍らで相対重力計を操作していたあの頃は，絶対重力計は自分には無縁のものと思っていたが，その2年半後の2001年に地熱貯留層の重力モニタリングに適用するために絶対重力計を導入した．あれから9年が過ぎた．その間の絶対重力測定現場での経験を報告する．

2. 絶対重力計FG5の導入

絶対重力計は鉛直重力加速度（いわゆる重力）を高精度で測定する装置である．重力によって加速しながら自由落下する物体の軌跡を正確に計測する．かつてガリレオはピサの斜塔で重さの異なる2つの玉が同時に着地することを確認したと言われている．実際には空気中では空気抵抗を受けるので，真空中を落下させることとし，更に真空残留空気の影響を少なくする工夫をこらす．私が1980年頃に受けた講義では佐久間式絶対重力計が最も有望との説明があった．友田ほか（1985）でも世界最高の精度を持つ装置として佐久間式を紹介している．佐久間式では一度投げ上げてから自由落下させることで残留空気の影響の相殺を図っている．これとは別にフォーラのグループが採用した落下箱方式がある（Faller, 2002）．測定対象の落下体を内部に納めた箱を落下体よりわずかに先行して落下させることで，残留空気の抵抗は落下箱には効くが，落下体への影響は小さくなる．佐久間型もフォーラ型も入射方向に反射光を返すコーナーキューブと呼ばれる反射体の自由落下をレーザ干渉計で計測する．ここで使われるのは光速が方向によらないことを示してアインシュタインの特殊相対性理論に大きく貢献した，マイケルソンモーリーの干渉計と同種のものだ．第1図に示すように入射したレーザ光は半透過鏡で2つに分かれる．上方に向かったレーザ光は自由落下する反射体で下方に向かい，静止反射体によって上方に向かった後，再び半透過鏡によって進行方向を変えて検出器に向かう．検出器に入る2つの光，直進したレーザ光と自由落下する反射体を経由したレーザ光の光路差に応じて光学的な干渉縞が発生する．長さ標準となる波長安定の良いレーザ光の干渉縞は，時間標準となる原子時計によって計数，計時され，正確な時間と距離の数値データを与える．このデータは放物線の軌跡に当てはめられ，重力加速度gの値が決められる．決定方法は計

1）産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード：絶対重力計，FG5，地熱貯留層，重力モニタリング，超伝導重力計



第1図　絶対重力計FG5の機構図.

測原理に則っており，長さと時間の標準によっているため，この重力加速度測定の方法は絶対計測と言える．フォーラ型絶対重力計は，その後，米国国家標準局とコロラド大学の共同研究組織JILAに引き継がれ，米国Micro-g社が製品化した（Faller, 2002）．第1図は，その絶対重力計FG5の機構図である．落下槽と呼ばれる真空円筒中に容器を上下させる機構を組み入れてあるが，その中で反射体は自由落下する．また静止反射体をスーパースプリング機構に吊ることで地動ノイズの影響を軽減している．

重力の慣用単位はガリレオに由来するGal（ガル）である．地表での重力値は約980Galであるが，FG5は1～2μGalの高精度測定を実現しており（Sasagawa *et al.*, 1995など），絶対重力計の標準機としての評価が定まっている．安定した精度に加えてFG5の可搬性の良さも画期的だった．大久保ほか（2001）が指摘したようにFG5以前に可搬型と称していた絶対重力計は「その気になれば運ぶことも可能」という程度の

写真1　国土地理院重力棟で計測中の絶対重力計FG5L/003．右側が落下距離7cmの落下槽．その三脚の足元の小さい円筒は地動を評価するための地震計．

ものであったのに対し，FG5は数個のコンテナに梱包されており，ワゴン車で運搬可能である．各コンテナは1人で持ち上げることができる重量・大きさなので，運搬から据付までを1人で行うことができる．絶対重力計FG5の組立てから計測開始までに要する時間は約1時間で，その手順は取扱説明書を参照すれば特に困難はない．経験者の立会いのもとに，一度操作を経験すれば一通りの操作を習得できる．

2000年に更に小型の絶対重力計FG5LがMicro-g社から発表された（写真1）．FG5では落下距離が20cmであったのを7cmまで縮めたことで落下槽は更に小型化され，併置した地震計の信号によって地動ノイズを除去することにしてスーパースプリング機構も外した．価格はFG5に比べて3分の1以下で，一方，FG5へのアップグレードの道も残された．これは地熱貯留層の変動探査法開発という当時進行中の研究プロジェクトにとって魅力的だった．地熱貯留層の重力モニタリングに絶対重力計を従来よりもはるかに低価格で導入できる．導入後の性能評価によって性能が不十分と判断しても定評のあるFG5にアップグレードできる．その場合，高額なFG5を一気に導入するよりも予算を手当てできる可能性は高い．2001年1月に通し番号003のFG5Lを導入して，すぐに大霧地熱地域での現場測定によって性能評価した（Sugihara, 2001）．FG5よりも一桁以上劣る精度を測定回数や観測上の工夫で実用レベルにすることは難しいと判断し，2002年初めに通し番号217のFG5（以後，

FG5/217と表記）にアップグレードした．なお，FG5の通し番号は100番台が約10台，200番台が30数台で現在は300番台になっているようだ．

現在，世界で使用されている絶対重力計のほとんどはFG5型絶対重力計であるが，佐久間式の投げ上げ型絶対重力計もイタリア計量研究所が採用して各地で計測に使われている（坪川, 2004）．私は以前，イタリアのブルカノ島で重力調査を行った時に，点の記を頼りに島内の絶対重力点に辿り着いた（杉原ほか, 2001）．そこで相対重力測定を行いながら見たことのない佐久間式絶対重力計を懐かしんだ．

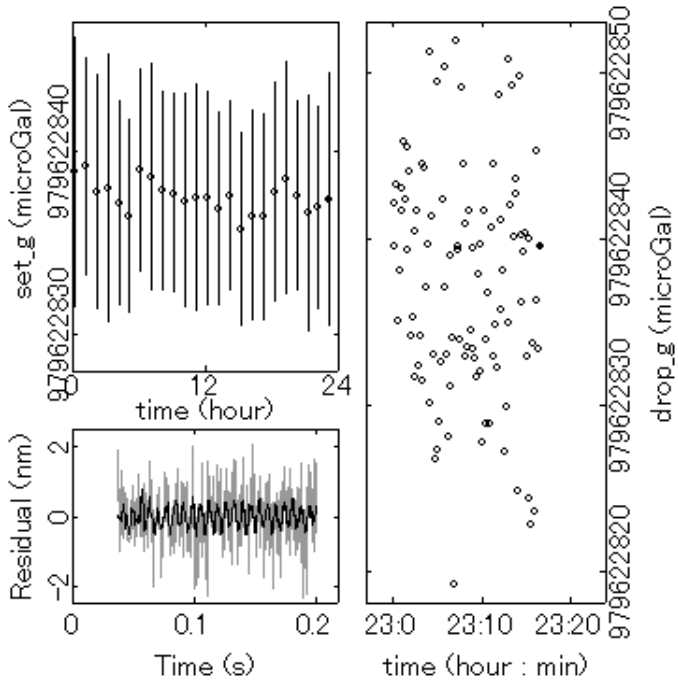
3. 米国コロラド州のMicro-g社

FG5/217は基本的には1年に1回製造元の米国Micro-g社で検定している．同社はコロラド大学のキャンパスがある米国コロラド州ボウルダー市の郊外にある．2003年1月に米国スタンフォード大学での地熱貯留層工学の研究集会に参加した折にボウルダーも訪ねて検定作業に立ち会った．ボウルダーは有森選手や高橋選手などマラソン日本代表選手の合宿地としても有名だが，きれいで落ち着いたところだ．米国は銃社会という思い込みが強い私は，学会では会場のホテルから出られず，治安が良いと言われるスタンフォード大学周辺でさえも大学隣接のホテルとキャンパスの行き来しかできないのだが，ボウルダーでは不安なく市内を1人で出歩けた．

検定作業は会社から少し離れたNOAA（米国海洋大気庁）のテーブルマウンテン重力観測所で行われていた．現地で痛感したのは地動ノイズの低さだった．計測前に欠かせない調整作業の1つに光路の鉛直確認がある．落下槽には気泡水準器が設置されていて，これで水準を合わせるが，更に第1図の落下反射体から下に向かう光路の途中にアルコールを満たした容器を挿し入れて，ここで反射させて，落下槽内の光路の鉛直性を確認する．鉛直からのずれの角度がAであれば，計測する絶対重力値は，本来の重力値に対してcosA乗じた小さい値になってしまう．光点が1つ分ずれていれば，15秒角の傾きに相当し，重力値は約4μGal小さく評価されてしまう．日本国内で調整作業をすると，光点は地動のためにゆらゆら動くのであるが，現地ではピタリと静止していた．

計測データも極めて安定していた．計測中は制御用PC画面に様々な情報を表示できるが，通常は各種計測値と各種設定値の一覧表に加えて第2図のように3種類の情報を並列表示することが多い．反射体は20cmの距離を約0.2秒で自由落下するが，その軌跡の当てはめ残差の振幅はわずか2nmである（第2図の左下図）．先に放物線への当てはめと書いたが実際は4次式を当てはめる．20cmの高度差を通して重力値を一定値とは見なせず，この区間では高さについて1次関数を仮定すると，落下距離は時間に対して2次成分を主要部とする4次式となる．重力鉛直勾配値は別途計測して与える．こうして1回の落下試験（Drop）毎に求められた重力値の分布は第2図右図のように示される．落下試験を何秒間隔で何回行うかを1 SETの計測条件として指定しておく．標準偏差の3倍の閾値を超える異常値を排除した上でSET毎の重力値が推定され，その分布が第2図左上図のように示される．SET計測を何分おきに何回繰り返すかを指定しておいて，これを1 Projectとする．10秒か15秒間隔のDropを100回で1 Set，30分間隔のSetを48回で1 projectとすることが多い．1つのprojectが終了すると日常点検票に従って調整を行い，次のprojectを再開する．このような測定を数日間行う．Drop数やDrop間隔は使用者や測定環境によって異なるが，1日単位で1 projectを行い，数日間の測定を行うのが一般的である．1日単位のデータは潮汐補正残差があったとしても平均処理によってほぼ相殺され，調整を経た日毎の平均値の比較によってデータ評価がより確実なものになるからである．テーブルマウンテンでの計測値は極めて安定していた．Drop毎に整数部9桁の数字が表示されるのを見ると，まさに絶対測定をしていると実感するが，その下2桁の数字が少し変化するだけなのを見て現地の静かさを感じた．検定作業では，重力測定値がよく調べられている地点で別の1台と併行測定を行い（写真2），値が一致しなければ，その原因を探り，必要な調整を行う．日本で行う場合に比べて，短い測定時間で評価ができてしまうことのメリットは大きい．技術者の手際の良さにも感心した．例えばアルコール入り容器を使う調整の際には，2つの光点が重なるように2つの調節ネジを回転させる．私が作業すると，行き過ぎたり不足したりで何回も操作するのであるが，1回の操作でピタリと合わせる．一事が万事その調子だった．

Micro-g社社内には，発表されて間もない新型絶



第2図　絶対重力計測中に表示されるデータ．テーブルマウンテン重力観測所での検定作業中の例．左上図はSet毎の重力値の分布，右図は左上図中の最後のSetについてのDrop毎の重力値の分布．左下図は右図中のDropについての自由落下軌跡当てはめ残差．灰色の曲線は最後のDrop，黒色は全てのDropの当てはめ残差の平均．

写真2　テーブルマウンテン重力観測所で検定中の2台のFG5．手前がFG5/217．奥は通し番号100番台のFG5．

対重力計A10が何台もあって，整備作業が行われていた．A10はFG5Lの小型落下槽を小型のスーパースプリング装置に重ねた形態をしていて，地動の影響を除去できる機能を持ち，且つ可搬性にすぐれた装置で保温機構もある．10 μGalという公称精度はFG5には劣るが，すぐれた可搬性を生かして，アラスカでは凍結した海上での野外測定にも使用された（Ferguson *et al.*, 2008）．但し，A10による現場調査結果の論文はMicro-g社の技術者が現場測定を担当しているこの調査関係のものしか未だ目にしていない．A10のレーザ装置はFG5Lと共通のものだが，それが扱いにくかった経験から一般使用者にはまだ取り扱いが難しい点が多いのではないかと推察している．最近，日本の地熱開発地域での重力モニタリングへのA10の適用が始まった（西島ほか，2008）．今後の成果に期待している．

4．筑波山麓の比較観測会

筑波山麓の国民宿舎「つくばね」では国土地理院の他にFG5を保有する地震研究所，京都大学と産総研が定期的に比較測定を行っている．こうした相互比較は絶対重力計の性能評価・状態把握にとって重要である．FG5の精度を評価付けたSasagawa *et al.*（1995）はあのテーブルマウンテン重力観測所での比較測定に基づく．フランスのパリ郊外のセーブル市の国際度量衡局（BIPM）では定期的に比較測定会が行われている（Vitushkin *et al.*, 2002）が，日本からは最近は産総研の計測標準研究部門が参加している．Francis and van Dam（2006）にはルクセンブルグの観測用坑道に15台の絶対重力計を並べて比較測定しているカラー写真が掲載されており壮観だ．この比較測定会に比べると5台で行われることが多い筑波山での比較測定会は小規模であるが，私とFG5/217にとっては貴重な機会である（写真3）．専用の測定室ではなく会議室を借りて行うのであるが，私が経験した国内の他の地点と比べて最も静かな環境にある．筑波山麓での比較測定には2002年以後，2008年を除いて毎回参加してきた．この比較観測会では各機関の絶対重力計を目の当たりにできるのも楽しみである．国土地理院のFG5/104，FG5/203と京都大学のFG5/210は南極昭和基地での計測にも使われた（平岡ほか，2005）．地震研究所

のFG5/109は噴火中の三宅島で使用された(古屋ほか, 2001)し, FG5/212は富士山頂に登った(大久保ほか, 2004). 計測標準研究部門のFG5/213はフランスでの比較測定会に参戦した(Vitushkin *et al.*, 2002). それに比べると我がFG5/217は地味ではあるが, 地熱開発現場という精密機器にとっては厳しい環境で頑張ってきたのだ.

参加者同士の情報交換は有意義だが, 調整作業の様子を眺めていてふと気付くこともある. FG5/213がBNCケーブルから光ファイバーまで全てをテープで床などに固定してあるのを見て, これはフランス仕込に違いないと思って, その次の測定からさりげなく真似てみたりもした. 動作不調の装置があると皆で囲んで原因を検討することもある. 不調の落下槽を開けて底に溜まった金属屑を目にしたことがあったが, 落下を繰り返す度に身を削っているように思えて心が痛んだ. 以後は測定回数の設定に慎重になった. 自分のFG5が他の装置と比べてどのような測定結果を出しているかは当然気になるが, 装置の状態を知るには比較測定は有意義だ. 今年の測定では, FG5/217が室内温度変化の影響を受けやすいことが気になった. こうした問題はその場で解決できなくても米国での検定の際に気になる点として申し送れば原因を調べてもらえる.

比較測定終了後に参加者一同が各々のFG5コントローラを持って国土地理院構内のVLBI局に入ったことがあった. VLBI局の大きなパラボラアンテナはつくば市内の一つのランドマークとなっているが, このアンテナで宇宙の果ての準星などからの電波を受信して地球規模の長い基線の測量を行い, プレートの動きを検出したりしている(高島・石原, 2008). 極めて精密な干渉計ということでVLBI局には最高品質の水素メーザがあるので, これとの比較により絶対重力計のルビジウム原子時計の中心周波数のずれなどを計測するのが目的だったが, 有名な施設に入れたことで得した気分だった.

筑波山での比較観測会は国土地理院重力係が運営してくださっているが, それ以外でもいろいろとお世話になっている. 国土地理院は3台のFG5を保有し全国の重力基準網構築を行っている(測地部, 1997). 重力測定棟内の絶対重力点および補助点では機器調整のために繰り返し絶対重力測定が行われているが, FG5/217の導入後2年ほどは, ここに度々

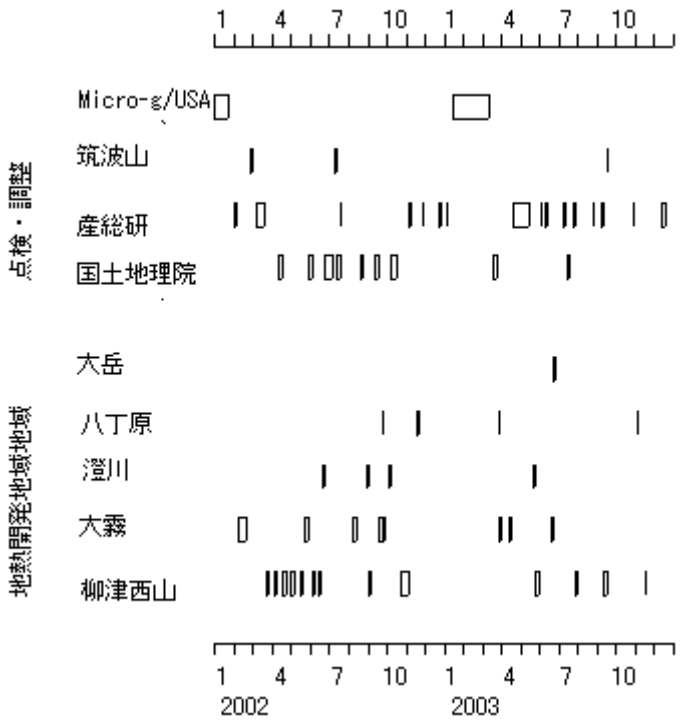
写真3　筑波山比較観測会の様子. 右手前がFG5/217. 左隣はFG5/212. 同じ通し番号200番台のFG5でも落下槽の三脚の形状が異なる.

FG5/217を持ち込んだ(第3図). 比較測定によってFG5/217の性能を確認するのが主目的だったが, 現場でトラブルが生じた時に持ち込んで相談したことも度々あった. 落下槽の落下箱を上下させるベルトが切れた時には, 南極観測を控えていた平岡喜文さん(平岡ほか, 2005)は, 絶対重力計に慣れておきたいからと言いながら, 木村勲さんと一緒にベルト交換までしてくださった. 国土地理院の歴代の重力係の方々には日本の重力測定を支えようという強い使命感を感じる.

一方, 産総研の計測標準研究部門にも重力棟があり, 2台のFG5(FG5/208とFG5/213)がある(Mizushima and Ooiwa, 2003). FG5/217の調子が悪くなった時に, その絶対重力計の部品と入れ替えてテスト計測を行って原因を追究させていただいたこともある. 前身の計量研究所には佐久間式絶対重力計の佐久間氏が所属していたこともあり(坪川, 2004), 絶対重力計との関わりは深い.

5. 地熱開発地域の測定現場

絶対重力測定を従来型の相対重力測定と同時期に行うことを大久保(2001)はハイブリッド重力測定として提唱し, 主として地震・火山活動に関する重力モニタリングで成果をあげている(古屋ほか, 2001; Tanaka *et al.*, 2001など). 従来行われていた相対重力測定では変動域から離れた場所に不動点を仮定する必要がある. しかし不動点を保証することは難しく,



第3図　FG5/217の導入後2年間の使用履歴．5箇所の地熱開発地域で計測を行った．

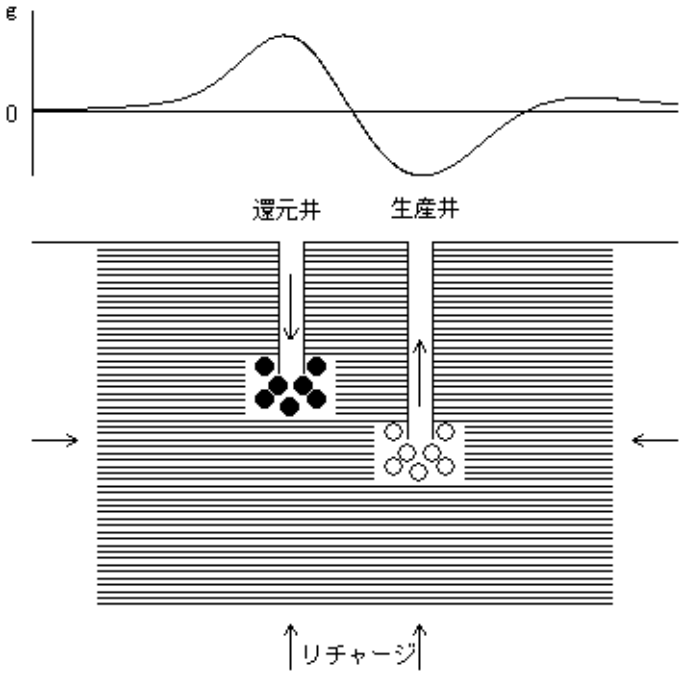
重力モニタリングデータから地下での質量変化を推定する際の誤差要因となっていた．絶対重力計の導入により，この問題の解決を図ることができる．

地熱貯留層の重力モニタリングの歴史は古く1960年代にさかのぼる（Hunt, 1970など）．地熱流体を胚胎する地熱貯留層に掘削した生産井から取り出した蒸気で発電用タービンを動かした後，熱水を還元井に戻すのであるが，地下では周囲からの地熱流体の供給（リチャージ）があると考えられる．こうした質量分布の変動により地表での重力が変化する（第4図）．地下でのリチャージは地熱エネルギー資源の再生可能性を評価する上で極めて重要である．地表での重力変化量の面積分から地下の質量変化量の体積積分を評価するというガウスの定理の応用によってリチャージ量を見積もったHunt（1970）の結果は，重力モニタリングへの関心を引いた．しかし，ガウスの定理の手法を実際に適用しようとすると基準値の誤差と積分範囲の打切り誤差という2つの問題がある（杉原，1998）（このことは第4図からも容易に推察できる．基準レベルと積分範囲の設定によって積分値は大きく変わる）．還元を行っていなかったために重力変化量が桁違いに大きかったHunt（1970）のデータには適用できたが，多くの場合は2つの誤差要因によるリチャージ量の見積誤差は大き過ぎて適用は難しい．絶対重力計を導入すれば基準値の誤差を小さくできる可能性はあるが，絶対重力計を使用した報告はわずかにGeri *et al.*（1982）があるだけで，それもハイブリッド方式の利用ではなく，近くで1回測定してみましたという程度のものだった．なお，使用機器はイタリア計量研究所の佐久間型である．

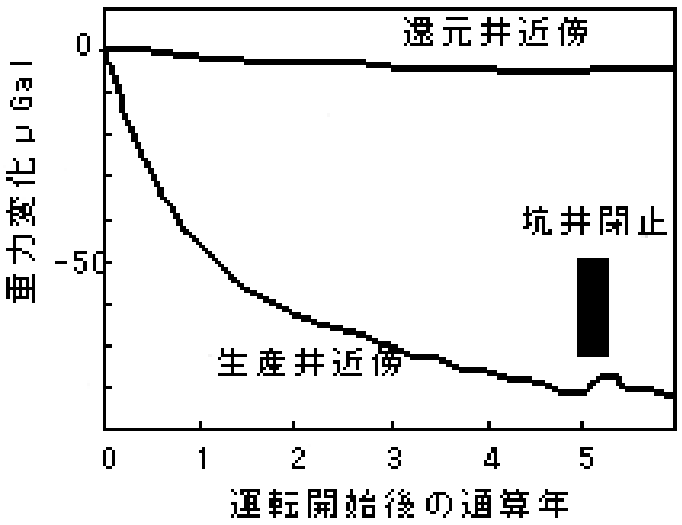
日本の地熱開発プロジェクトのうち1997年から始まった貯留層変動探査法開発で，中心テーマの1つとなったのは地表で計測される地球物理データの活用だった（當舎ほか，2001；石戸，2002；Ishido *et al.*,2005）．坑井データに加えて各種の地球物理データに対しても，地熱貯留層の数値モデルに基づく計算値を観測値と比較し，観測値を再現できるように数値モデルを改良していく．特に重力と自然電位は比較的手軽に計測できる手法として例示されることが多かった．第5図は，実際の貯留層の数値モデルから計算で予想した重力変化を時間軸に対して示したものだが，浅部に形成された蒸気層による重力減少の効果が大きいために，第4図とは異なり還元井付近でも重力は減少している．一時的な坑井閉止によって生産井付近で観測可能な短期的な重力増加も予測された（Ishido *et al.*, 2005）．ハイブリッド重力モニタリングによって，(1) 短期応答を確認し，(2) 長期変動については，開発から時間が経過して重力変動量が比較的小さくなった段階の高精度のデータが，リチャージ量の推定に有効であることを明らかにできた（Sugihara and Ishido, 2008）．

こうして絶対重力計の導入の成果はあったのだが，自然電位モニタリングでは連続測定の有効性を確認できたのに対して，重力モニタリングに連続測定を導入できなかったことは心残りとなった．スプリング式相対重力計の連続データの利用は補正のための補助データにとどまるものであったし（Sugihara, 1999），絶対重力計を長期間，連続的に運用することは難しかった（Sugihara, 2001）．

現在は地熱開発研究プロジェクトが休止状態であ



第4図　地熱での重力変動の概念モデル（石戸ほか, 1992を改変）.



第5図　貯留層変動探査法の研究プロジェクトで注目した重力変動パターン（Ishido *et al.*, 2005を改変）.

るが, 貯留層変動探査法で検討された手法はCO_2地中貯留プロジェクトへの応用が試みられている（石戸ほか, 2006）. 帯水層にCO_2を注入して貯留する場合, 帯水層中の塩水にCO_2が溶け込むと密度はわずかに増加するので重力増加が観測されることになる. 一方, 気相CO_2または液相CO_2に置き換わると密度はかなり低下するため重力減少が生じる. 重力モニタリングによる実測値と数値モデルに基づく予測計算値の比較によって, CO_2が予定していたように貯留されるかどうかを確認するとともに, 地下貯留構造モデルを更新できる. ノルウェー沖の北海油田のスライプナーでは海底重力計を利用して重力モニタリングが行われ, CO_2の地中貯留状況が確認されている（Alnes *et al.*, 2008など）. 私達は数値シミュレーションにより様々な場合を想定した予測計算を行っているが, CO_2地中貯留プロジェクトに関連した重力変動の実測定は適当な調査地がないために未だ行っていない. 最近の私達のハイブリッド方式での重力変動調査の主な対象は地下水調査である（Sugihara *et al.*, 2009）. 地下水の水位変化, あるいはその上部の不飽和領域中の水分の増減によって重力変化が生じうる. 以前は別の目的の重力変動調査の中で補正処理のために地下水変化の影響評価を行うことが多かったが, 最近は地下水挙動調査を主目的とする重力変動調査の報告が増えている（Pool, 2008など）.

ここで冒頭に登場した地震で転倒した相対重力計シントレクスCG3M/352のその後の消息に触れておく. 地震発生1時間後には現場に入ってセットしなおして計測を継続したが, 17日後に突然記録できなくなった. 停止する5日前にすぐ近くを台風が通過した時に, 40hPaもの急な気圧変化へのきれいな応答記録を残した（杉原, 1998）. スプリング式相対重力計にはあたりはずれがあると言われる中で, この重力計はあたりだったのだが, その後, 時々不安定な挙動を示すようになったので, 新型が発表されたのを機にアップグレードした. CG5/352として生まれ変わった相対重力計は, 絶対重力計FG5/217と共にハイブリッド重力モニタリングの現場で今も活躍している.

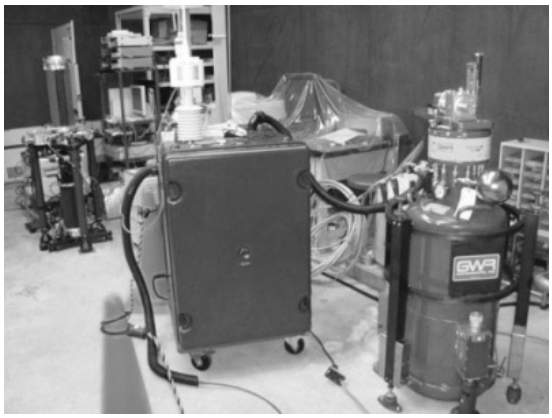


写真4　筑波大学での超伝導重力計（右手前）と絶対重力計FG5/217（左奥）の比較測定．

6. 筑波大学での超伝導重力計との比較測定

2008年の3月に名和一成さんから，筑波大学で超伝導重力計が稼働中なので見学に行きませんかと誘われた．名和さんは南極越冬観測中に取得した超伝導重力計の記録から常時地球振動を検出したことで有名だ（Nawa *et al.*, 1998；須田ほか, 1998）．その信号レベルは数nGalという驚くべきものだ．名和さんは超伝導重力計の長期間の記録から静穏な時期の記録を選び，更に時間毎のスペクトルデータを比較することで数nGalとういう微小信号を検出したのだった．名和さんもすごいが超伝導重力計もすごい．通常使用されるスプリング式の可搬型相対重力計は言わば精密なバネ秤であるが，超伝導重力計ではマイスナー効果による磁気浮上力がバネの力の代わりになる．極低温状態の安定性と低ノイズのために超伝導重力計は極めて高感度で安定な相対重力計となっている．

筑波大学での超伝導重力計の見学に話を戻そう．絶対重力計を併置して記念撮影したいと希望したところ快く承諾していただいたので，FG5/217が米国での検定から戻るのを待って7月に4日間の併行測定を行った．年が明けて別の超伝導重力計が筑波大学に到着したのでその検定のために比較測定してみませんかと再びお誘いを受けた．超伝導重力計は相対重力計であるために感度を検定する必要があること，またドリフト成分を評価するためにゼロ点をチェックする必要があるためである（東ほか, 2009など）．第三世代の超伝導重力計と言われる新型超伝導重力計の国内初お目見えとのことなので，二つ返事で引き受けた．新しい超伝導重力計は見た目にも非常にコンパクトだった（写真4）．筑波大学の池田博さんと極地研究所の土井浩一郎さんのお話によれば，原理は第一世代と同じで測定精度も同様であるが，ヘリウム補給の必要性がなくなり，リモートコントロールも可能になり，観測維持の手間もコストも激減したとのことだった．

ちょうどその頃はCO_2地中貯留の重力モニタリングについての学会発表準備中だった．一般にはCO_2が超臨界状態となる地下千数百mへの地中貯留が有望とされているが，多く存在する数百mの深度の小規模帯水層貯留の利用可能性も数値シミュレーションで検討していた．地下千数百mの場合に比べて浅い分だけ地表での重力変化量は大きくなり，重力モニタリングが容易になる．計算では400日間の注入後，1,200日までの変化を追跡したが，注入井直上では検出可能な重力変化が数年にわたって起こる．その変化の様子は注入量にはもちろん依存するが，地下構造によっても変わる．そのような重力変化を観測するには超伝導重力計の利用が最適に思えたので，学会発表予稿原稿に書き加えた（杉原・石戸, 2009）．

超伝導重力計と絶対重力計を組み合わせた観測による学術研究の報告は多く，補正目的で設置点付近の地下水変化の影響を評価した報告も多い（Imanishi *et al.*, 2006など）．コスト評価も重要な実用研究にとっては，高価であり維持管理も簡単ではないということで超伝導重力計の適用は見送られていた．しかし維持管理の容易な第三世代の超伝導重力計の登場によって状況が変わる予感がする．絶対重力計にFG5が登場した状況に似ていると思われる．絶対重力計と可搬型相対重力計によるハイブリッド重力モニタリングに，超伝導重力計による高感度な連続観測を加えた，言わば究極のハイブリッド重力モニタリングの適用を検討する時期に来ているのではないだろうか？

7. おわりに

9年前の絶対重力計の導入は石戸経士さんのご尽力で実現した．その石戸さんの記念シンポジウム「貯留層変動探査法の目指したこと」が2009年4月15日に

行われた．ちょうどその懇親会の時間帯に地熱開発の現状と課題をとりあげたNHKの番組「クローズアップ現代」が放映された．懇親会の余興として，参加者で歓談しながら番組を視聴した．地球温暖化対策の一環として再生可能エネルギーと認識される地熱エネルギー開発への期待が世界的に高まっている中，外国に比べて出遅れている日本の現状と課題を論じていた．取材を受けた人が懇親会会場にもいて，その場面では歓声も上がった．「それではどうしたらよいのでしょうか？」と国谷裕子キャスターが眉をひそめて新しい技術の可能性を問いかけた．石戸さんの頭越しにTV画面を見ていた私には，それが石戸さんからの問いかけにも聞こえた．番組内で解説者が答えているのを聞きながら，私の頭の中で石戸さんの図（第5図）と筑波大学での観測風景（写真4）が重なった．新型超伝導重力計を導入して究極のハイブリッド重力モニタリングを適用してみてはどうだろうか？超伝導重力計が登場して間もない頃に地熱開発地域での計測報告がある（Olson and Warburton, 1979；Goodkind, 1986）が，その内容は地熱貯留層評価に直結するものではなかった．貯留層変動探査研究でできなかった重力変動の連続観測は超伝導重力計の導入によって行うことができるはずだ．高価な超伝導重力計の導入コストへの疑問はあるだろうが，それに対しては究極のハイブリッド重力モニタリングによって得られる情報の費用対効果を慎重に評価してみればよいだろう．それによって新規坑井掘削計画を左右できるほどの情報が得られるのであれば検討に値すると言えるだろう．定期点検時の一時的な坑井閉止に伴う短期的な重力変化や開発初期の重力変化など，連続記録から有効な情報が得られそうな状況を貯留層の数値モデルで評価し，十分な変動が期待できると予測された調査地をハシゴしていけば，導入コストに見合う成果が得られるのではないか？ 前節末で述べた浅部帯水層へのCO_2貯留はまだ机上の案にすぎないが，地熱貯留層のモニタリングへの適用は現実的な課題として有望と思える．

謝辞：絶対重力計に私がかかわるきっかけを与えてくださった石戸さんに感謝します．筑波山麓での比較観測会の関係者，とりわけ国土地理院の重力係の方々に感謝します．超伝導重力計について教えていただいた池田さん，土井さん，名和さんに感謝します．

引　用　文　献

Alnes, H., Eiken, O. and Stenvold, T.（2008）：Monitoring gas production and CO_2 injection at the Sleipner field using time-lapse gravimetry, Geophysics, 73, no.6, WA155-WA161.

Faller, J. E.（2002）：Thirty years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances, Metrologia, 39, 425-428.

Ferguson, J. F., Klopping, F. J., Chen, T., Seibert, E., Hare, J. L. and Brady, J. L.（2008）：The 4D microgravity method for waterflood surveillance: Part 3 - 4D absolute microgravity surveys at Prudhoe Bay, Alaska, Geophysics, 73, no.6, WA163-WA171.

Francis, O. and van Dam, T.（2006）：Analysis of results of the International comparison of absolute gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2003, Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, 26, 1-23.

古屋正人・大久保修平・田中愛幸・孫文科・渡辺秀文・及川　純・前川徳光（2001）：重力の時空間変化でとらえた三宅島2000年火山活動におけるカルデラ形成過程，地学雑誌，110，217-225.

Geri, G., Marson, I., Ross, A. and Toro, B.（1982）：Gravity and elevation changes in the Travale geothermal field (Tuscany) Italy, Geothermics, 11, 153-161.

Goodkind, J. M.（1986）：Continuous measurements of non-tidal variations of gravity, J. Geophys. Res., 91, 9125-9134.

東　敏博・福田洋一・田村良明・佐藤忠弘・竹本修三・早河英章・由井智志・大橋正健・内山　隆（2009）：神岡鉱山における繰り返し絶対重力測定と重力季節変化，測地学会誌，55，87-93.

平岡喜文・木村　勲・福田洋一・土井浩一郎・渋谷和雄（2005）：可搬型絶対重力計FG5による南極における重力測定（III），国土地理院時報，108，21-27.

Hunt, T. M.（1970）：Gravity changes at Wairakei geothermal field, New Zealand, Geol. Soc. Am. Bull., 81, 529-536.

Imanishi, Y., Kokubo, K. and Tatehata, H.（2006）：Effect of underground water on gravity observation at Matsushiro, Japan, J. Geodynamics, 41, 221-226.

石戸経士（2002）：地熱貯留層工学，日本地熱調査会，176p.

Ishido, T., K. Goko, M. Adachi, J. Ishizaki, T. Tosha, Y. Nishi, M. Sugihara, S. Takakura and T. Kikuchi（2005）：System integration of various geophysical measurements for reservoir monitoring: World Geothermal Congress 2005, Proceedings, paper number 1160.

石戸経士・杉原光彦・菊地恒夫（1992）：地熱レザバーモニタリング，物理探査，45，522-534.

石戸恒雄・杉原光彦・當舎利行（2006）：帯水層CO_2地中貯留の物理探査モニタリング，地質ニュース，621，38-44.

Mizushima, S. and Ooiwa, A.（2003）：Realization of reliable gravity measurement at the NMIJ/AIST, Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, 22, 75-82.

Nawa, K., Suda, N., Fukao, Y., Sato, T., Aoyama, Y. and Shibuya, K.（1998）：Incessant excitation of the Earth's free oscillations, Earth Planets Space, 50, 3-8.

西島　潤・Saibi, H.・藤光康宏・福田洋一・長谷川　崇・谷口真人（2008）：重力変動観測による地下流体モニタリング−A10絶対重力計を用いた地下流体流動検出の試み−，日本地熱学会平成20年度学術講演会，P19.

大久保修平（2001）：ハイブリッド重力観測で追う，地震・火山活動，2000年三宅島火山活動と伊豆諸島群発地震活動，地震ジャー

ナル，31，47–58.
大久保修平・黒石裕樹・町田守人・平岡喜文（2001）：御前崎における絶対重力測定，月刊地球，号外33，89–96.
大久保修平・高木朗充・新谷昌人・松本滋夫・福井敬一・孫文科（2004）：富士山頂における絶対重力測定，月刊地球号外48，56–61.
Olson, J. J. and Warburton, R. J.（1979）：Continuous gravity observations at The Geysers: a preliminary report, GRC Transactions, 3, 519–522.
Pool, D. R.（2008）：The utility of gravity and water level monitoring at alluvial aquifer wells in southern Arizona, *Geophysics*, **72**, WA49–WA59.
Sasagawa, G. S., Klopping, F., Niebauer, T. M., Faller, J. E. and Hilt, R. L.（1995）：Intracomparison tests of the FG5 absolute gravity meters, GRL, 22, 461–464.
測地部（1997）：新しい日本重力基準網の構築，国土地理院時報，87，13–20.
須田直樹・名和一成・小林直樹（1998）：地球のささやきを聞く，常時地球自由振動の発見，科学，68，859–863.
杉原光彦（1998）：重力モニタリング実用上の課題，物理探査，51，602–612.
Sugihara, M.（1999）：Continuous gravity measurements for reservoir monitoring, Proc. 24th Stanford Workshop on geothermal reservoir engineering, 287–292.
Sugihara, M.（2001）：Absolute gravity measurements for geothermal reservoir monitoring, *GRC Trans.*, Vol.25, 697–700.
Sugihara, M. and Ishido, T.（2008）：Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry, Geophysics, 73, no.6, WA37–WA47.
杉原光彦・石戸経士（2009）：CO_2帯水層貯留の重力モニタリングについて，資源素材学会平成21年度春季大会，A–2.
Sugihara, M., Nishi, Y., Takakura, S. and Ishido, T.（2009）：Repeated absolute and relative gravity measurements for groundwater monitoring, Proc. SEGJ2009.
杉原光彦・大熊茂雄・中野　俊・古川竜太（2001）：ブルカノ島での重力調査，地質ニュース，559，25–31.
杉原光彦・山本宏章（1998）：岩手山麓絶対重力点でのシントレクス重力計による連続観測，日本地震学会1998年度秋季大会，P38.
高島和宏・石原　操（2008）：国土地理院における超長基線測量の変遷，測地学会誌，54，205–219.
Tanaka, Y., Okubo, S., Machida, M., Kimura, I. and Kosuga, T.（2001）：First detection of absolute gravity change caused by earthquake, GRL, 28, 2979–2981.
友田好文・鈴木弘道・土屋　淳（1985）：地球観測ハンドブック，東京大学出版会，830.
當舎利行・石戸経士・中西繁隆・横井浩一（2001）：地熱地域における貯留層診断技術（熱水流動シミュレーションと組み合わせた解析方法），物理探査，54，433–454.
坪川恒也（2004）：絶対重力計開発の経緯と現状−佐久間晃彦先生を偲んで−，測地学会誌，50，281–294.
Vitushkin, L. and 43 authors（2002）：Results of the Sixth International Comparison of Absolute Gravimeters, ICAG-2001, Metrologia, 39, 407–424.

SUGIHARA Mituhiko（2010）：A field report of absolute gravity measurements with the FG5/217.

＜受付：2009年7月23日＞